



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**CYKlickÉ ZÁTĚŽOVÉ TESTY LITHIOVÝCH
AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ**

CYCLIC TESTS OF LITHIUM STORAGE SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Koňak

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Morávek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Koňak

ID: 203253

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Cyklické zátěžové testy lithiových akumulčních systémů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše komerčních lithiových akumulčních systémů
2. Definice parametrů vybíjecích/nabíjecích cyklů s ohledem na zvolený typ akumulátoru
3. Sestavení pracoviště pro provádění automatických vybíjecích a nabíjecích cyklů
4. Variantní zpracování jednotlivých scénářů pro testování
5. Vyhodnocení naměřených dat, zpracování výstupních reportů pro jednotlivé scénáře

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Jan Morávek, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Bibliografická citace práce:

KOŇAK, Tomáš. Cyklické zátěžové testy lithiových akumulčních systémů. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135550>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Morávek

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Cyklické zátěžové testy lithiových akumulčních systémů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 1.6.2021

.....

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou cyklických záťažových testov lítiových akumulátorov. V práci sú predstavené spôsoby akumulácie elektrickej energie. V praktickej časti sa venujem zostaveniu pracoviska na vykonávanie automatických vybíjacích a nabíjacích cyklov.

KLÍČOVÉ SLOVÁ: Akumulácia elektrickej energie, batérie, akumulčný systém, cyklické testy

ABSTRACT

The bachelor's thesis focused on problematics of cyclic tests of lithium storage systems. The thesis introduces the methods of accumulation of electricity. The practical part deals with the assembly of a workplace for the implementation of automatic discharging and charging cycles.

KEY WORDS: Accumulation of electricity, batteries, storage system, cyclic tests

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV	7
ZOZNAM TABULIEK.....	8
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	9
1 ÚVOD.....	10
2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENIA PROBLEMATIKY.....	11
2.1 BATÉRIE.....	11
2.2 VÝVOJ A TYPOLÓGIA BATÉRIÍ	11
2.2.1 LITHIOVÉ BATÉRIE.....	13
2.2.2 LÍTIUM-IONOVÉ BATÉRIE.....	14
2.2.3 CHARAKTER LÍTIUM-IONOVEJ BATÉRIE	15
2.3 LÍTIOVÉ AKUMULÁTORY	22
2.3.1 CHEMICKÉ A FYZICKÉ BATÉRIE	27
3 LÍTIOVÉ AKUMULAČNÉ SYSTÉMY.....	30
3.1 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM.....	30
3.2 NÁVRH BMS PRE KONKRÉTNU APLIKÁCIU.....	34
9 ZÁVER.....	35
POUŽITÁ LITERATÚRA.....	36

ZOZNAM OBRÁZKOV

ZOZNAM TABULIEK

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

1 ÚVOD

Od svojho uvedenia na trh na začiatku 90. rokov si lítium-iónové batérie našli cestu do najrôznejších aplikácií vrátane stacionárneho ukladania energie v inteligentných sieťach. Predpokladá sa, že ide o aplikáciu, ktorá bude rýchlo rásť, v neposlednom rade z dôvodu rastúceho rozširovania výroby obnoviteľnej energie a s tým spojených požiadaviek na decentralizáciu a stabilizáciu takýchto zdrojov energie. Lítium-iónové (Li-ion) batérie spoločnosť Sony uviedla na trh v roku 1991 predovšetkým na použitie v spotrebných výrobkoch. Odvtedy sa stali najbežnejšie používanou technológiou batérií na uskladnenie energie v mriežke. Lítium-iónové batérie majú všestrannosť pre použitie v menších aplikáciách, ako je napríklad napájanie elektrických vozidiel, ako aj v sieťových aplikáciách vyžadujúcich megawatty energie po dobu niekoľkých hodín. Cieľom bakalárskej práce je zostaviť pracovisko na cyklické záťažové testy lítiových akumulčných systémov.

V predloženej bakalárskej práci sa budeme venovať problematike batérií a lítiovými akumulčným systémom. V teoretickej časti sa zameriame na charakteristiku súčasného stavu vybranej problematiky. Charakterizujeme jednotlivé druhy batérií a ich typológiu ako aj akumuláciu energie a akumulčné systémy.

V praktickej časti sa zameriame na zostavenie pracoviska na meranie cyklických záťažových testov lítiových akumulčných systémov na báze LiFePO_4 .

2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

2.1 Batérie

Každý článok má elektródy dve, kde jedna je označovaná ako anóda a druhá ako katóda. Elektródy musia byť z rôznych materiálov, aby mohlo v elektrochemickom systéme dôjsť k vytvoreniu rozdielov elektrochemických potenciálov. Prenos náboja medzi elektródami pri procesoch nabíjanie a vybíjanie zaist'uje elektrolyt, ktorý je vodičom takzvané druhého druhu. Elektrolytom bývajú často vodné roztoky solí, organické roztoky alebo vodné roztoky kyseliny alebo hydroxidu. Aby sa zamedzilo vnútornému skratu - teda vodivému prepojenie kolektorov, prípadne elektród, je v systéme inštalovaný separátor. Úlohou separátora je umožniť priechod iónov a zároveň zabezpečiť elektrickú izoláciu anódy od katódy. Samotný separátor je väčšinou plastová fólia s mikrootvory pre priechod iónov [1]

V niektorých prípadoch je ako separátor použitý aj iný izolačný materiál, napríklad keramika.

Obal článku musia zabezpečiť celkovú mechanickú súdržnosť celého systému, eliminovať možné úniky aktívneho materiálu či elektrolytu. V prípade požiadaviek na hermetickosť obale musí zároveň zabezpečiť možnosť prípadného odvetranie pri náraste tlaku vo vnútri. Najčastejšie sa používajú plastové nádoby, prípadne nádoby nerezové. V minulosti boli používané aj nádoby z tvrdej gumy (autobatérie) alebo nádoby sklenené (u staničných otvorených batérií) [1].

2.2 Vývoj a typológia batérií

Príchod elektrického štartéra patril medzi dôležité produkty, vďaka ktorej sa olovené batérie začali vyrábať vo veľkom množstve. S príchodom väčších technologických požiadaviek, najmä vo vojnových konfliktoch, a zvýšenia energetických potrieb spoločností sa vynaložilo väčšie úsilie na zabezpečenie zdrojov energie pre vyvíjajúce sa mechanizmy, ktoré si vyžadovali na krátky čas obrovskú elektrickú energiu, napríklad námorné torpédo v rýchлом vývoji. Na tieto účely boli vyvinuté výkonné a drahé batérie, ako napríklad články zo striebra / zinku a zinku / dichrómanu. Dokázali dodať veľké množstvo energie na mnoho sekúnd až minút. Tieto batérie vyžadovali nielen starostlivé zaobchádzanie a vyškolený personál pre správne a bezpečné použitie, ale boli tiež veľmi nákladné [2].

Na základe zákona zachovania energie nemožno energiu vytvoriť, iba transformovať. Napríklad elektrina sa môže transformovať na zvukovú, svetelnú, tepelnú a pohybovú energiu. Pred pochopením elektriny neexistovali takmer žiadne spôsoby skladovania energie, preto bol vynález batérie dôležitý. Éra štúdia elektriny sa datuje na začiatok 17. storočia, kedy William Gilbert vytvoril termín elektrina. Batéria bola objavená počas experimentov s chovaním elektriny a magnetizmu. Prvá batéria, pomenovaná ako hromada Voltaic, zostrojil Alessandro Volta vďaka jeho hlbokým znalostiam chémie a fyziky. Na batérie vznikli požiadavky, ako napríklad stabilita prúdu a napätia a mobilita batérie. Vývoj nabíjateľnej batérie umožňoval použitie v mobilných zariadeniach a komerčné využitie. S inováciami, ako je elektromotor a baterka, prichádzali nové a prísnejšie požiadavky [3].

Pre komerčný úspech bola dôležitá cena batérie a kapacita pre dlhú prevádzku zariadenia bez nabíjania. Okrem toho sa na vyrovnanie výkyvov elektrického distribučného systému používajú batérie. Zvyšujúca sa potreba mobilných elektrických zariadení a ich špecifické vlastnosti vedú k diferenciacii batérií na rôzne typy. Tento typ sa vyznačuje rôznymi vlastnosťami a hlavnými vlastnosťami batérií sú nasledujúce:

- Typ batérie: znamená to, či ide o primárny (nenabíjateľný) alebo sekundárny (nabíjateľný) článok. Napätie, ktoré môže batéria produkovať, a súvisiaca vnútorná impedancia určujú jej schopnosť prenášať prúd.
- Kapacita batérie sa meria v ampéroch za hodinu a rovná sa množstvu elektrického náboja, ktorý je možné dodať pri menovitom napätí.
- Celoživotná priepustnosť energie je vo wattoch za hodinu a určuje, koľko energie je možné odobrať do bunky, kým sa kapacita batérie zníži na 80% pôvodnej kapacity. Podobná, zatiaľ čo ľahšia charakteristika, je množstvo cyklov nabíjania a vybíjania pred znížením kapacity.
- Krivka vybitia určuje vzťah medzi napätím a percentom vybitej kapacity. Snahou je mať plochú výbojovú krivku, takže napätie počas používania batérie zostane konštantné.
- Dôležitá je tiež teplotná charakteristika batérie, pretože napätie a čas vybíjania sa môžu meniť so zmenami teploty.
- Fyzikálne požiadavky určujú geometriu a veľkosť článku, hmotnosť a umiestnenie koncoviek.
- Hĺbka vybitia: Môžeme hovoriť o dosiahnuteľnej hĺbke vybitia, za touto hranicou hrozí nenávratné poškodenie batérie.
- Cena batérie ovplyvňuje konečnú cenu produktu [3].

V dnešnej dobe máme rôzne typy a technológie batérií vhodných pre rôzne zariadenia a ich potreby. Používame ich v každodenných mobilných zariadeniach, ako sú mobilné telefóny, notebooky, hodinky, autá, lekárske prístroje, vesmírne sondy, veľké úložiská energie atď. [3].

Počas prvej časti 19. storočia prebiehal dôležitý prebiehajúci výskum elektrickej energie, ktorý ovplyvnil výskum batérií. Napríklad najdôležitejšie boli nasledujúce. V roku 1859 francúzsky fyzik Gaston Plante vynášiel „olovenú batériu, prvú nabíjateľnú batériu.

Konštrukcia bola nasledovná: dva olovené pláty (olovená anóda a katóda oxidu olovičitého) oddelené gumovými pásikmi boli zvinuté do špirály a ponorené do roztoku kyseliny sírovej. Batérie s tekutým elektrolytom boli pre mobilné použitie nepraktické, pretože mohol unikať elektrolyt. Preto francúzsky elektrotechnik Georges Leclanche prišiel s „vynálezom“ suchého článku”. Mobilita sa dosiahla zmenou elektrolytu z kvapalnej na pastovú konzistenciu. Táto skoro suchá bunka sa používala pre telefóny [3].

V roku 1989 bol vo Výskumnom centre Battelle-Geneve vyvinutý NiMH akumulátor. Batéria NiMH vylepšovala známu technológiu nikel-vodíkových batérií vyvinutú v roku 1970. Batéria NiMH je podobná batérii NiCd, ale líši sa materiálom anódy. Batérie NiMH majú minimálne dvakrát vyššiu kapacitu pri rovnakej veľkosti ako batérie NiCd [4].

Hustota energie NiMH batérií môže konkurovať lítium-iónovým batériám. Pretože sú šetrné k životnému prostrediu, dajú sa rýchlo nabiť a umožňujú veľa životných cyklov, dodnes sa používajú v mnohých aplikáciách. Napájali skoré mobilné telefóny, zubné kefky, fotoaparáty a mnoho ďalších zariadení. Batérie NiMH však trpeli pamäťovým efektom; preto sú dnes NiMH batérie často nahradené lítium-iónovými článkami [4].

2.2.1 Lithiové batérie

Náročnejšie použitie batérií v elektronike viedlo k použitiu lítia ako anódy batérie. Takéto bunky dosahovali vysokú hustotu energie, malý pamäťový efekt a nízke samovybíjanie. Lítiové batérie majú tiež niektoré nevýhody ako starnutie, chemická reaktivita, potreba ochranných obvodov a vyššie výrobné náklady. Lítium ako batériovú anódu prvýkrát použil v roku 1970 anglický chemik M. Stanley Whittingham, pôvod tohto vynálezu však datuje do roku 1912 americký fyzikálny chemik Gilbert Newton Lewis. K ich rozšíreniu došlo v roku 1977 po aplikácii a výskume v laboratóriách Bell, kde sa pre veľkú hustotu energie študovali mobilné zariadenia.

Trvalo takmer desať rokov výskumu, kým bola vyrobená prvá bezpečná a priemyselne použiteľná batéria [5].

Predchádzajúce experimenty sa pokúšali použiť rôzne typy elektród, ale vyskytol sa problém s nestabilitou lítia, únikom plynov spôsobujúcich plamene a zmenami na lítiovej elektróde po nabíjaciach cykloch. Batéria od spoločnosti Akira Yoshino bola stabilná, pretože ako elektródy používala lítny kobalt a lítiový ión. Lítny kobalt je vo vzduchu stabilný. Lítium-iónová batéria bola uvedená na trh v japonskej spoločnosti Sony v roku 1991 [5].

2.2.2 Lítium-ionové batérie

Lítium-iónové batérie („LIB“) sú kľúčovými faktormi znižovania nákladov v hybridných, plug-in hybridných a elektrických vozidlách. Významné zlepšenia v oblasti výkonu, bezpečnosti a životného cyklu v posledných niekoľkých rokoch teraz umožňujú vyrábať tieto technológie za rozumné náklady. Výsledkom je, že automobilový priemysel sa stal hlavným potenciálnym zákazníkom pre priemysel LIB. Zároveň sa otvorili dvere vstupu nových hráčov na trh.

Lítium-iónové batérie sa široko používajú ako zdroj energie v rôznych aplikáciách približne 40 rokov, odkedy Goodenough vytvoril prvé lítium-iónové batérie v roku 1980 a spoločnosť Sony uviedla na trh prvú komerčnú lítium-iónovú batériu v roku 1991. Vďaka svojej vynikajúcej hustote energie a hustote výkonu, vysokému napätiu článku v otvorenom obvode, vysokej účinnosti, vysokej prevádzkovej teplote okolia, nízkej hmotnosti a dlhej životnosti sa lítiové batérie široko používajú v elektrických vozidlách (EV) a hybridných elektrických vozidlách (HEV) [6].

V rámci vývoja technológie vyžaduje trh s elektrickými vozidlami na splnenie prevádzkových potrieb elektrických vozidiel vysokú hustotu energie a batérie so špecifickým pohonom [6,7]. Preto musíme neustále študovať novú generáciu batérií a neustále porozumieť charakteristikám batérie, aby sme mohli vyvinúť dobré systémy správy batérií, ktoré zaručia bezpečnosť batérie, predĺžia jej životnosť a umožnia im splniť vysoké požiadavky EV.

Prvú praktickú batériu úspešne vyvinul taliansky vedec Volta na začiatku devätnásteho storočia, potom batérie prešli vývojom olovených batérií, batérií na báze oxidu strieborného, nikelkadmiových batérií, zinko-mangánových batérií, palivových článkov, lítium-iónových batérií batérie, lítium-sírové batérie a všetky polovodičové lítium-iónové batérie.

Aby bolo možné vykonať presný odhad stavu a implementovať ochranu pred nabíjaním / vybíjaním, ochranu pred prehriatím a kontrolu prúdu / napätia pre lítium-iónové batérie, je potrebné podrobne preskúmať ich vlastnosti. Prvé lítium-iónové batérie používali ako záporné elektródy kovové lítium, má výhody vysokej hustoty energie. Chemické aktivity kovového lítia sú však príliš

silné. V procese nabíjania lítiových batérií môže dôjsť k tvorbe lítneho dendritu. Pri hromadení kryštálov môže vnútorný skrat batérie viesť k výbuchu. Aj keď súčasný priemysel batérií používa namiesto zápornej elektródy namiesto lítneho kovu grafit, lítium-iónové batérie majú stále obmedzenia v oblasti nedostatočného využitia aktívnych materiálov, poškodenia materiálu vyvolaného stresom, vyblednutia kapacity a tepelného úniku [6].

Ďalšou dôležitou charakteristikou batérie, ktorú je potrebné študovať, je strata kapacity batérie a tvorba tepla pri nízkych alebo vysokých rýchlostiach C. Testy batériových článkov zahŕňajú prebitie, nadmerné vybitie, skrat, zahriatie, prepichnutie, vypadnutie, vytláčanie, nízky tlak, ponorenie do morskej vody a teplotný cyklus. Testy defektu, pretláčania, prebitia a skratu sú bežnou súčasťou súčasných zlyhaní testu. V prípade pomeru zlyhania rôznych materiálových systémov prekračujú materiálové batérie NMC 85%. Hlavnou výzvou pre budúcu generáciu elektrických vozidiel je, ako riadiť generovanie tepla z akumulátora podľa jeho tepelných charakteristík [6].

2.2.3 Charakter Lítium-ionovej batérie

S rastúcim poklesom fosílnej energie sa intenzívne presadzovali udržateľné zdroje energie, ako napríklad slnečná a veterná energia. Medzitým má výroba energie z týchto zdrojov vážny dopad na stabilitu energetického systému z dôvodu ich náhodnosti a prerušovania v procese výroby energie [7].

V systéme skladovania energie z batérií sa tradične často používajú olovené batérie, ktoré vedú k mnohým nevýhodám, ako je nízka hustota energie, nízka rýchlosť nabíjania a znečistenie životného prostredia, a preto nemôže spĺňať požiadavky dlhého -termný systém skladovania energie. Lítium-iónová batéria je novovznikajúci akumulátor, ktorý má toľko výhod, ako je nízka hmotnosť, malé rozmery, vysoká hustota energie a žiadne znečistenie životného prostredia. Procesy nabíjania a vybíjania sa realizujú tam a späť migráciou lítiových iónov medzi kladnou a zápornou elektródou. Typická lítium-iónová batéria pozostáva z kladnej elektródy, zápornej elektródy, separátora a elektrolytu.

Najčastejšie používanou pozitívnou elektródou sú LiCoO_2 , iFePO_4 , LiMn_2O_4 a NCM a negatívny grafit alebo lítium titaničitan. Materiál lítium titaničitan známy ako materiál s nulovým kmeňom má štruktúru spinelu, ktorého objem buniek sa po niekoľkých cykloch zmenší. Batéria titaničitanu lítneho navyše nemá tuhú elektrolytovú interfázu (SEI), ktorá zabraňuje vyblednutiu kapacity a má preto dlhšiu životnosť. Pri použití energetického systému sa batérie vždy používajú na ukladanie energie, ale nie na nabíjanie alebo vybíjanie. Tento článok skúma vlastnosti lítium-titaničitých batérií pri normálnej teplote v skladovacom poli [8].

Dopyt po lítium-iónových batériách je obrovský v oblasti prenosných elektronických zariadení (mobilné telefóny, počítače a videokamery), elektrických vozidiel a vesmírnych technológií. V porovnaní s bežnými systémami majú lítiové nabíjateľné batérie vyššiu hustotu energie, vyššie napätie a dlhšiu životnosť. Oxid lítny kobaltnatý (LiCoO_2) je jedným z najlepších katódových materiálov pre lítium-iónové batérie vďaka vysokému výstupnému napätiu a vysokej špecifickej energii. Jeho teoretická špecifická kapacita a hustota energie sú 274 mA h / ga 1070 W h / kg [9].

LiCoO_2 môže existovať v dvoch formách: modifikácia s nízkou teplotou (LT) so štruktúrou podobnou spinelu (skupina $\text{Fd}3\text{m}$), v ktorej je 6% iónov Co^{3+} + umiestnených v lítiových lokalitách, a úprava s vysokou teplotou (HT) s ideálnym dvojrozmerným obsahom Štruktúra a- NaFeO_2 ($\text{R}3\text{m}$) [9].

LiCoO_2 je možné pripraviť rôznymi spôsobmi. Elektrochemická účinnosť tohto materiálu silne závisí od mnohých vlastností, napríklad od veľkosti častíc, kryštalinity, fázového zloženia a dopantov.

Riadenie týchto parametrov technikou sol-gel [9], chemickými cestami [10] a hydrotermálnou metódou ponúka veľa výhod pri výrobe materiálov s pokročilými vlastnosťami. Hydrotermálna syntéza sa úspešne využíva na prípravu komplexných koordinovaných zlúčenín, rast veľkých monokryštálov, nanokryštalických materiálov a filmov, atď. Jedným z potenciálnych problémov výroby nových Li-ion batérií môže byť nedostatok lítia, a s tým spojená jeho vysoká cena [11]. Existujúce zásoby tohto kovu sa s rozmachom elektrických vozidiel a rastom dopytu po nových batériách rýchlejšie vyčerpávajú [12].

Zdroj [13] uvádza možné riešenie tejto situácie. Už v dnešnej dobe sme schopní pomocou 2krokového procesu, využívajúceho mechanického a hydrometalurgickej systému, získať z Li-ion batériou 80-100% materiálu späť ako sekundárny zdroj na výrobu nových batérií [16]. Tento fakt by mohol do budúcnosti problém nedostatku stavebného materiálu čiastočne vyriešiť, avšak je stále nutné vytvoriť dobré systémy recyklácie Li-ion batériou a aplikovať spomínaný 2krokový proces, aby sme sa vyhli situácii, keď nebudeme mať dostatok lítia (prípadne tiež kobaltu) pre stavbu nových batérií [14].

Podľa [15] sa Li-ion batéria s LiFePO_4 používajú v kombinácii so solárnymi panelmi a zdroj [16] uvádza ich aplikáciu s veternou elektrárnou. Je teda zrejme možné využiť LiFePO_4 batérie pre akumuláciu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, čo korešponduje so zadáním tejto práce, a preto sa bude nasledujúca kapitola zaoberať ich bližší charakteristikou.

Jednou z dôležitých predností LFP batérií oproti iným lítium iónovým chemickým batériám je tepelná a chemická stabilita, čo zvyšuje ich bezpečnosť. Tento jav je spôsobený silnejší chemickou väzbou fosfátu železa oproti oxidovým väzbám iných druhov batérií. Pri migrácii lítiových iónov z LiCoO_2 buniek dochádza k nelineárnej expanzii v CoO_2 , čo má vplyv na štruktúrnu integritu bunky. Zatiaľ čo u LiFePO_4 sú obaja stavy, pred migráciou aj po nej, štruktúrne podobné, to znamená, že bunky LiFePO_4 sú konštrukčne stabilnejšie než LiCoO_2 bunky. Tieto batérie sú tiež vysoko odolné pri strate kyslíka, ktorá obvykle vedie k exotermickej reakcii lítia v iných bunkách. Vďaka tomuto sú lítium fosfátové bunky oveľa horšie zapáliteľné v prípade nesprávneho zaobchádzania s batériou (najmä pri nabíjaní). Ani táto technológia neochráni batériu proti úmyselnému zneužitiu [15].

LiFePO_4 batérie využívajú lithium-ion-deriváty podobné s inými lítium iónovými chemickými batériami. Aj cez to, že majú mnoho výhod aj nevýhod podobných existujúcim, medzi nimi značné rozdiely. LFP chémia ponúka dlhší životný cyklus ako iné lítium iónovej technológie. Rovnako ako batérie na báze niklu a na rozdiel od ostatných li-ion batérií, LFP batérie majú konštantné vybíjacie napätie. Toto napätie zostáva po celú dobu vybíjania článku tesne pri hodnote 3.2V, kým nie je batéria úplne vybitá, to umožňuje batériu dodávať prakticky plný výkon do úplného vybitia, čo umožňuje v aplikácii použitia jednoduchších obvodov pre reguláciu napätia.

Vzhľadom na to, že nominálne napätie jedného článku je 3.2V, stačí pre dosiahnutie napätia 12.8V zaradiť do batérie štyri články oproti šiestich, ktoré by boli potrebné u olovokyselinových batérií. Pri uvažovaní bezpečnostných vlastností LFP sa z nich stáva dobrá náhrada olovokyselinových batérií v mnohých aplikáciách, ako napríklad automobilový priemysel a solárne aplikácie. Využitie fosforečnanov znižuje potencionálne ekologické riziko pri neodbornej likvidácii batérie, tiež zjednodušuje následnú ekologickú likvidáciu oproti kobaltovým batériám. Oproti LiCoO_2 disponuje Li-fosfát vyšším menovitým prúdom a vyšším špičkovým výkonom, ktorý batérie dodá. Pri týchto stavoch nedochádza k nebezpečnému prehrievaniu batérie. V neposlednom rade patrí medzi prednosti LFP batériou nízka miera samovybíjania batérie v odloženom stave, je udávané, že si LiFePO_4 batérie udržia svoju kapacitu až jeden rok skladovania.

Medzi špecifikácie LiFePO_4 patria:

- Napätie článkov:
 - Napätie vybité batérie = 2,8 V
 - Pracovné napätie = 3,0 - 3,2 V
 - Maximálna hodnota napätia nabitých batérií = 3,6 V

- Objemová hustota energie = 220 Wh / dm³ (790kJ / dm³)
- Merná hmotnosť energie = 90 Wh / kg (> 320 J / g)
- 100% DOD životnosť (počet cyklov na 80% pôvodnej kapacity) = 2 000 - 7 000
- 90% DOD životnosť (počet cyklov na 80% pôvodnej kapacity) > 10 000
- Katódové zloženie:
 - 90% C-LiFePO₄, Phos-Dev-12
 - 5% Carbon EBN-10-10 (superior grafit)
 - 5% PVDF (polyvinylidénfluorid)
 - Veľkosť katódy v článku = 1,54 cm²
- Elektrolyt: Ethylene carbon - Dimethyl carbon (EC-DMC) 1-1 LiClO₄ 1M [8].
- Anóda: Grafit alebo ťažký uhlík prímiesou LiFe

Tieto batérie využívajú do svojich vozidiel americká spoločnosť Aterra Motors, ktorá sa zaoberá vývojom športových kompozitných vozidiel. Vďaka vyššiemu napätiu jednotlivých článkov je LFP batéria vhodná ako napájací zdroj LED svetidiel, bez nutnosti použitia step-up obvodov. Uplatnenie LiFePO₄ nie je len v priemyselných aplikáciách alebo v doprave, tieto batérie sú využívané aj v elektronických cigaretách vďaka svojim bezpečnostným parametrom a nízkej toxicite článkov. V modeloch RC áut nahrádzajú NiMH, alebo LiPo batérie, pretože nie je potreba regulátor napätia, pretože tieto konkrétne batérie poskytujú 6,6V menovitého napätia a nedochádza k jeho postupnému poklesu v priebehu vybíjania [8].

LFP článok obsahuje kladnú a zápornú elektródu a medzi nimi je elektrolyt. Kladná katóda je tvorená zlúčeninami lítia LiFePO₄. Záporná anóda je vyrobená z uhlíkového materiálu (grafit). Elektrolyt tvorí lítiové soli (najčastejšie LiPF₄) v organickom rozpúšťadle, či zachytené v špeciálnom polyméru (plastu). Pri nabíjaní takmer nedochádza k chemickým reakciám, ale ióny lítia iba prechádzajú z katódy do elektrolytu a ďalej do štruktúry anódy. Pri vybíjaní je tento proces presne opačný, ióny lítia sa z anódy vracajú cez elektrolyt na katódu (preto názov "lítium iónová"). Pretože je medzi anódou a katódou elektrické napätie, musia byť dobre oddelené membránou, ktorá síce dovoľí pohyb iónov, ale zabráni skratu medzi elektródami. V praxi sa najčastejšie používa veľmi tenká keramická fólia, ktorá na prvý pohľad vyzerá ako papier [8].

Lithium polymérové a mangán / kobaltové články o menovitom napätí 3,7 V chemicky degradujú už po 300 - 1000 nabíjaciach cykloch. Napätie týchto článkov je vysoké (až 4,2 V),

dochádza preto k zrýchlenému usadzovaniu spevneného elektrolytu na elektródach a ich oxidácii. To bráni ďalšej výmene iónov lítia, zvyšuje vnútorný odpor článkov a kapacita batérie rýchlo klesá. Oproti tomu LiFePO₄ články si ešte po 8 000 cykloch zachovávajú 80% pôvodnej kapacity. Ako je to možné? Sedimentácia elektrolytu na anóde a oxidácie na katóde prebiehajú najviac pri napätiach článku nad 3,9 V a teplotách nad 50 °C. Týmto napätím a teplotám sa ale LFP batérie pri prevádzke ani nepriblížia. Nabijú sa totiž najčastejšie na 3,6 V a pri prevádzke sa nezahrievajú.

Kým ostatné druhy Li-Ion batériou s katódou založenú na kobaltu a mangánu môžu pri skrate či prebití ľahko vzplanúť, či dokonca explodovať, u LiFePO₄ je táto reakcia vylúčená. Je to dané tým, že materiál katódy je v podstate prírodný nerast - minerál, veľmi podobný olivínu. Ten ani pri vysokých teplotách neuvolňuje kyslík (je ňľahké narušiť jeho chemické väzby) a je odolný oxidácii.¹⁵ Ochrana životného prostredia LFP batérie neobsahujú ťažké kovy (mangán a kobalt) a sú tu dobré predpoklady pre budúce ľahkú recykláciu. Aj pri náhodnom prieniku do životného prostredia ale nehrozia žiadne škody, len strata cenných surovín.

Vlastnosti LFP článkov sa perfektne zhodujú s potrebami elektromobility a Energetiky. Vďaka napätiu článku 3,2 V je možné zo 4 článkov zložiť 12,8V batériu a použiť ju ako priamu náhradu klasických olovených batérií s napätím 12 V. Nízky vnútorný odpor umožňuje LFP články vybiť aj nabíjať prúdmi až 3 C, takže batériu možno plne nabiť už za 20 minút. Pri prevádzke si udržiavajú konštantné napätie cca 3,2 V bez ohľadu na stupeň vybitia 16, čo eliminuje potrebu prídavných regulačných prvkov.

LFP články majú nižšiu menovité napätie (3,2 V) a teda aj nižšiu hustotu energie na 1 kg. Navyše, v dôsledku prítomnosti železa, sa hmotnosť článku ešte zvyšuje na výsledných cca 80 - 100 Wh / kg. U Li-Pol či NMC článkov možno bez problémov dosiahnuť hustoty dvojnásobnej (160 - 200 Wh / kg). Vybrané LiFePO₄ články treba správne pripraviť pre ich zostavenie do batérie (packu). Tomu vždy predchádza kontrola napätia, polarita a celkového stavu všetkých článkov. Až potom je možné sa pustiť do iniciačného dobíjania, usporiadanie, fixácie a prepojenie jednotlivých článkov.

Z výroby sú články nabité asi len na 30% svojej skutočnej kapacity. Preto je potrebné ich pred prvým použitím dobiť do plnej a zhodnej kapacity. Práve to nazývame iniciačným nabíjaním alebo tiež formátovaním. Správny postup je taký, že najskôr všetky styčné plochy článkov (terminály) očistíme jemným brúsny papierom, paralelne spojíme originálnymi prepojkami, na proti ľahli konca zostavy pripojíme káble nabíjacieho zdroja (nabíjač, laboratórne zdroj ...) a nabíjame odporúčaným prúdom podľa datasheetu do hodnoty napätia 3,6 až 3,8 V. Po

dosiahnutí cieľového napätia paralelné zostavu opäť rozpojíme a zostavíme do sériového zapojenia podľa požadovaného napätia batérie [15].

V prípade použitia terminálového BMS (Battery Management System, napr. 123Smart) je vhodné použiť namiesto skrutiek závitové trne / tyče, a to predovšetkým pre koncové terminály. Prvou maticou na trni dotiahneme medzičlánkovú prepojkú a zostávajúco závit nad ňou zvolíme v takej dĺžke, aby sme mohli nezávisle osadiť moduly BMS či iné príslušenstvo. Ak chceme použiť centrálny BMS, alebo články len kontrolovať a balansovať periodicky, je vhodné už teraz z jednotlivých prepojenia vyviesť vodiče na spoločnú svorkovnicu na prístupnom okraji batérie [16].

Koncové terminály opatríme poistkou a izolovaným silovým konektorom a na všetky terminály osadíme kryty vo farbe polarity.

Články v zostave umiestnime tak, aby terminály a poistné ventily smerovali nahor. Polohu na hrane s terminálmi do boku neodporúčame. Pri dlhodobej polohe "naležato" článok stratí kapacitu a môže dôjsť k úniku elektrolytu a / alebo korózii terminálov. Pri použití rezistorového balansovania, či pri vysokých prevádzkových prúdoch, je potrebné zaistiť odvetranie tepla. Ak je to možné, volíme umiestnenie batérie mimo prostredia pod bodom mrazu a teplôt nad 40 °C.

Pack vždy je navrhujeme tak, aby jednotlivé články boli orientované opačnými terminálmi k sebe a mohli sme tak používať výhradne originálne prepojky. Rôzne dĺžky a prevedenie prepojek spôsobí pri dlhodobej prevádzke rozbalancovanie článkov, a to je nežiaduce. Nepružné prepojky zase môžu spôsobiť mechanické uvoľnenie terminálov a elektród, preto je zásadne nepoužívame. Najľahšie možno články do stabilného celku fixovať paletovú sťahovacou páskou. Ďalšou možnosťou je napr. Výroba šasi z uholníkov a dosiek, sa spoločným krytom živých častí batérie. Pre trvalé uloženie batériového packu vždy používame 6boký, dostatočne mechanicky odolný box z nehorľavého materiálu [16].

Spojovací materiál (skrutky, podložky a matice) musí byť z nerezovej ocele. Vždy používame plochú aj pérovou podložku na každom skrutkovanom spoji. Využívame väčšinu závitov v termináli, ale nikdy nedopustíme dotiahnutie skrutky či závitové tyče až na úplné dno terminálu - prerazením terminálu dlhým skrutkou dôjde k zničeniu článku. Pri sériovo paralelnom usporiadaní prepojíme články najskôr paralelne a tieto bloky následne sériovo. Nikdy nie naopak [16].

Pokiaľ je zostava správne navrhnutá, jednotlivé sériovo spojené články sa počas prevádzky významne nerozchádzajú v napätí (nerozbalancujú sa). Systém vždy nastavíme tak, aby sa

batéria nedostávala do medzných stavov, tj. Na príliš nízke alebo vysoké napätie jedného článku vzhľadom k jeho povoleným minimám a maximám. Z funkcií BMS využívame v bežnej prevádzke predovšetkým informáciu o stave nabitia (SoC - State of Charge) a kontrolujeme hĺbku vybitia (DoD - Depth of Discharge) [16].

Rozbalancování článkov spôsobujú predovšetkým opakované medzné stavy, kde sa prejaví aj ich minimálna rozdielna kapacita. Čím častejšie sú také stavy, tým pravdepodobnejšie a väčšia je rozbalancování a tým viac sú potrebné vyrovnávacie (balancovacie) systémy. Preto odporúčame prevádzku najviac v rozmedzí 90% - 20% SoC. Pri teplote okolo 20 ° C a odporúčaných prevádzkových prúdoch sú to hodnoty cca 3,55 V a 3,0 V. 28 Predovšetkým sa znižovaním teploty okolia sa toto napäťové rozmedzí mení a SoC je potrebné merať štandardnou výpočtovou metódou odobraného a dodaného prúdu pomocou prúdových senzorov. Dlhो trvajúce maximálne hodnoty prúdov, zvlášť pri nízkych teplotách a nízkom SoC, zapríčiní rozbalancování článkov, a to aj pri minimálnych rozdieloch vnútorného odporu článkov. Vysoké vybíjacie a nabíjacie prúdy tiež sťažujú či dokonca vylučujú určenie SoC a DoD iba pomocou napätia batérie [17].

Väčšina LFP sieťových nabíjačov nabíja buď konštantným napätím (CV), konštantným prúdom (CC) alebo kombináciou, teda najprv CC a po dosiahnutí požadovaného% SoC metódou CV. Kľúčovou funkciou nabíjačky je, aby po dosiahnutí požadovaného% SoC (najčastejšie definované dosiahnutím nastaveného napätia) nabíjania prerušil, a to bez napäťovej hysterézie. LFP články sa nesmie trvale udržiavať na najvyššom dobíjacom napätí, či sa k nemu periodicky vracajú, pokiaľ neboli po dokončení nabíjania aspoň čiastočne vybité. Hovoríme o tzv. Kapacitnej hysterézii, nie napäťovej [17].

Charakteristika a zásady nabíjania sú obdobné ako pri sieťových nabíjačov. Nabíjanie má ale kvôli slnečným podmienkam nepredvídateľný priebeh, nedochádza k plynulému nabitie na nastavené% SoC a úplne tak zlyháva metóda určenia zostávajúcej kapacity batériového packu iba meraním napätia.

BMS je havarijná poistka proti poškodeniu batériového packu vybitím alebo naopak prebitím. Rozhodne nesmie slúžiť na prevádzkové odpájanie záťaže. Tá sa musí odpájať sama pomocou vhodne nastavenej vnútornej logiky závislé na celkovom napätí batériového packu alebo na výpočtu SoC. Príkladom môžu byť solárne regulátory, ktoré u LiFePO₄ článkov nastavujeme na hodnotu LFP alebo ak táto voľba chýba, potom na "GEL". Ukončenie nabíjania alebo vybíjania je potom realizované samotným regulátorom a nie BMS. Podobne je možné nastaviť aj striedača a nabíjačky [17].

Prevládania funkcie BMS má podobnú funkciu ako poistka v elektrickom okruhu. Používame ju ako ochranu proti zlyhaniu pripojených modulov (striedač, nabíjač ...) alebo rozbalancování niektorého článku kvôli výrobnnej odchýlke či chybe montáže. Výkonné, sofistikované a kvalitné BMS pre prevádzku batérie v režime 100% DoD vysokými prúdmi sú pomerne nákladné. Ak namiesto investície do takej BMS použijeme túto sumu na zvýšenie kapacity packu a použijeme sa o správnom prevádzky a servisu batérie s jednoduchým BMS, dosiahneme lepší výsledok.

2.3 Lítiové akumulátory

V posledných rokoch je v takmer všetkých oblastiach použitia viditeľný posun od používania nikel-kadmiových (Ni-Cd) a nikel-metal hydridových (Ni-MH) akumulátorov k akumulátorom lítiovým. Tieto akumulátory sa komerčne používajú od začiatku deväťdesiatych rokov a ich vlastnosti vo väčšine parametrov prekonávajú bežné Ni-Cd, Ni-MH aj olovené akumulátory. Základnou výhodou je vyššia energetická hustota týchto akumulátorov ako objemová, tak hmotnostná. Ďalej je u nich aj nižšie samovybíjanie ako u väčšiny ostatných akumulátorov, princíp nabíjania je jednoduchý a dobíjanie je možné vykonávať v akomkoľvek okamihu (stavu vybitia) bez negatívneho vplyvu na výkony akumulátorov. Sú k dispozícii v množstve typov a prevedení [18].

Lítiové akumulátory sú akumulátory s bezvodým elektrolytom (na rozdiel od napríklad olovených akumulátorov), využívajúci pre kladnú elektródu lítium-kobalt oxid (LiCoO_2), lítium-mangán oxid (LiMn_2O_4), lítium-nikel dioxid (LiNiO_2) a ďalšie, napríklad lítium-vanád oxid (LiV_2O_5). Elektrolytom je najčastejšie lítium hexafluorofosfát, LiPF_6 , v nepolárnom organickom rozpúšťadle a záporná elektróda je vyrobená z uhlíkového materiálu. [19]

Ióny lítia sa pri nabíjaní presúvajú z kladnej elektródy na zápornú. [20], [21] Princíp funkcie lítiového akumulátora je znázornený na obrázku 1. Zásadným rozdielom oproti iným typom akumulátorov je, že ióny lítia iba interkalujú do štruktúry zápornej elektródy (interkalovať - vmiesť sa do mriežky materiálu bez chemickej reakcie so samotným materiálom). To znamená, že v podstate neprebíha chemická reakcia a je tak dosiahnuté veľmi dlhý životnosť bez veľkých zmien vo výkonoch akumulátora. Ďalším rozdielom je vyššia menovitá napätie, ktoré u lítium-

iónových (Li-Ion) a lítium-polymérových (Li-Pol) akumulátorov dosahuje 3,6-3,7 V na článok, u akumulátorov lítium-železo-fosfát (LiFe) potom 3,2 V na článok, respektíve 2,4 V na článok u akumulátorov lítium-titán-oxid (LTO) [23]

Energetická hustota je vyššia ako u ostatných typov akumulátorov z veľkej časti práve kvôli vyššiemu napätiu. Vybíjací napäťová krivka je relatívne plochá, čo je výhodné, pretože napájané zariadenie má po dlhú dobu takmer konštantné vstupné napätie, na druhú stranu je ťažšie zistiť stav nabitia z napätia akumulátora. Nevýhodou je použitie lítia a jeho zlúčenín, ktoré na vzduchu, a najmä pri styku s vlhkosťou reagujú a degradujú. Preto je treba opatrne narábať s akumulátormi tak, aby nedošlo k narušeniu tesnosti ich plášťa. Novšie typy akumulátorov používajú relatívne menej reaktívne materiály, avšak aj napriek tomu existuje pri porušení článku riziko požiaru, najmä potom vtedy, keď dôjde k prepichnutiu článku a skratu jednotlivých vrstiev. [23], [25]

Potom sa vysoká energetická hustota stáva naopak nevýhodou, kedy sa energia v akumulátore veľmi rýchlo premení na teplo. Nejde iba o reakciu materiálov s kyslíkom a vzdušnou vlhkosťou, ale aj prudké zahrievaní v dôsledku skratu, ktoré môže zapáliť materiály v okolí akumulátora. Ďalšou nevýhodou je, že po prvom nabití akumulátor postupne v čase stráca kapacitu, aj keď nie je používaný. Materiály vo vnútri článku postupne samovoľne degradujú, čo je nevratný proces. Výkony týchto akumulátorov tiež klesajú so znižujúcou sa teplotou. V súčasnosti je komerčne dostupných niekoľko variantov lítiových akumulátorov. Najprv je pri prípadnom nákupe treba dať pozor na nenabíjacie lítiové batérie. Tie sú často používané do prístrojov s nízkym odberom a potrebou dlhej životnosti (niekoľko rokov). Avšak, ako primárne články, sa po vybití nedajú opäť nabiť a je potrebné ich zrecyklovať [26]

Prvým typom lítiových akumulátorov sú lítium-iónové (Li-Ion) články s kvapalným elektrolytom, často vo forme valcových článkov, kde sú elektródy zvinuté po obvode článku. Nabíjacie napätie je 4,2 V na článok, menovité 3,6 V. Komerčne často dostupné vo veľkosti "18650" = 18 mm priemer, 65 mm dĺžka [25]

Plášť týchto akumulátorov je kovový, s tlakovou poistkou pre prípad prebitiu a úniku plynov. Tieto akumulátory sú preto relatívne bezpečné a mechanicky odolné. Používajú sa často v batériách notebookov alebo, v serioparalelném radení, aj pre výkonovo náročné aplikácie. Napríklad akumulátory elektromobilov Tesla sú zložené z mnohých sérioparalelne spojených malých valcových článkov, nie z menšieho množstva sériovo spojených článkov s veľkou kapacitou. Energetická hustota sa pohybuje medzi cca 150-200 Wh / kg. Ďalším veľmi rozšíreným typom sú lítium-polymérové (Li-Pol) články. Tu nie je elektrolyt kvapalný, ale je to polymérna zlúčenina, ktorá je iónovo vodivá. [26].

Články sú väčšinou v obale z hliníkovej fólie a môžu byť aj relatívne pružné. Avšak pri mechanickej deformácii môže dôjsť ku skratom a poškodenia štruktúry článku, preto sa články ohýbať nesmie a je potrebné ich poškodeniu zabrániť. Elektrody článku sú pokladané na seba, nie zvinovanie, a môžu mať najrôznejšie tvar. Toho sa využíva napríklad v notebookoch či tabletoch, kde sa nepravidelne tvarovanými akumulátory "vypĺňa priestor". Energetická hustota je mierne vyššia ako u článkov s kovovým obalom, práve kvôli uspokojenej hmotnosti. Menovité napätie je 3,6-3,7 V, nabíjací 4,2 V. Tretím typom sú články lítium-železo-fosfát, skrátené označované ako LiFe, prípadne LiFePO₄, alebo LiFeYPO₄ - ak je do materiálu kladnej elektródy pridané ytrium pre zlepšenie vodivosti a zvýšenie stability štruktúry LiFePO₄ [26].

Nabíjacie napätie článkov je 3,6 V, menovité 3,2 V. Ich energetická hustota je preto nižšie, cca 90-120 Wh / kg. [9] Výhodou proti predchádzajúcim typom je vyššia prúdová zaťažiteľnosť vzhľadom ku kapacite a istá odolnosť proti hlbokému vybitiu (materiál kladnej elektródy je potiahnutý veľmi tenkým filmom z materiálu priepustného pre ióny, ktorý chráni katódu pred degradáciou [10]). Avšak ani tu nie je hlboké vybíjanie povolené a dochádza k významnému skráteniu životnosti a poklesu výkonu takto podvybíjaných článkov [23]

Tieto akumulátory sa s výhodou používajú ako priama náhrada olovených akumulátorov, pretože štvorčlánkovou sada má pri prevádzke veľmi podobné napätie ako 12V Pb akumulátor. Posledným používaným typom sú akumulátory lítium-titán (skrátene LTO podľa materiálu anódy - Li₄Ti₅O₁₂ = lítium-titan-oxid). Katóda je rovnaká ako Li-Ion / Li-Pol akumulátorov. Materiál LTO má veľkú mernú plochu vzhľadom k hmotnosti, takže je možné rýchle nabíjanie a vybíjanie. Ďalšou výhodou je možná prevádzka za nízkych teplôt a veľmi dlhá cyklická životnosť (tisíce cyklov). Naopak nevýhodou je nižšia menovité napätie - 2,4 V. Energetická hustota je tak zatiaľ nižšia ako u predchádzajúcich typov, výskum sa zameriava na jej zvýšenie. [27]

Využitie lítiových akumulátorov je veľmi široké. Od spotrebnej elektroniky, mobilných telefónov, notebookov, tabletov a pod. Cez svetlá, napájanie ručného náradia až po zdroj energie pre elektromobily a elektromotocykly. V notebookoch, tabletoch a pod. Sa používajú hlavne Li-Ion a Li-Pol akumulátory s ohľadom na čo najnižšiu hmotnosť. LiFe akumulátory sa potom používajú ako záložné zdroje, náhrada Pb akumulátorov, zdroje pre napájanie elektroskútre apod. Akumulátory LTO nájdu využitie v aplikáciách, kde je dôležité rýchle nabíjanie, vybíjanie a veľký počet cyklov. Kapacita Lítiové akumulátory sú vyrábané v širokom rozmedzí kapacít od desiatok mAh po desiatky až stovky Ah. Články je možné sérioparalelne radiť, a tým navyšovať kapacitu a výstupné napätie. Nie je problémom článok s kapacitou v poriadku mAh, ani sada akumulátorov o

stovkách Ah. Pri radení jednotlivých článkov sériovo musí byť ale vždy použité obvody, ktoré monitorujú a prípadne regulujú napätie jednotlivých článkov [27]

Tieto obvody sú často nazývané balančné, pretože v ideálnom prípade spolupracujú s nabíjačkou, a tak "balansujú" napätie článkov pri nabití na rovnakú úroveň (niekedy zaisťujú iba odpojenie pri prekročení maximálnej hodnoty napätia). Ak by tieto obvody chýbali, mohlo by v dôsledku miernych odchýlok medzi článkami dôjsť postupne k nadmernému vybitiu, alebo nabitie niektorého z článkov, čo by mohlo spôsobiť jeho zničenie. Nielenže by tak klesol výkon celej zostavy, ale v prípade prebitia by mohol vzniknúť aj požiar. Balančné obvody môžu byť súčasťou akumulátora, alebo nabíjačky (potom je potrebné z akumulátora vyviesť kontakty všetkých článkov). Tieto obvody nie sú používané pri niektorých batériách, ktoré sú priamo vyrábané ako nedeliteľné "bloky". Samotné nabíjanie sa vykonáva metódou CC-CV = konštantný prúd - konštantné napätie. Pri tomto spôsobe nabíjania sa nabíja najprv nastaveným prúdom až do nastaveného koncového napätia. Dosiahnutím koncového napätia sa prúd postupne znižuje a napätie zostáva konštantné. Nabíjanie je teda podobné ako u Pb akumulátorov, ale odlišné od nabíjania Ni-Cd a Ni-MH akumulátorov. Budúcnosť V súčasnosti prebieha výskum niekoľkými smermi. Jedným z nich je zvyšovanie napätia akumulátorov k hranici 5 V. Toho je dosahované prímiesami do materiálu kladnej elektródy. Problémom je zatiaľ nízka cyklická životnosť takto upravených materiálov. Ďalším možným smerom je použitie síry ako elektródového materiálu, tu je ale opäť problém s cyklickou zaťažiteľnosťou [27]

Podobne sú na tom aj akumulátory s obsahom kremíka. Prakticky sa tak v súčasnej dobe inovácie komerčných produktov obmedzujú na rôzne prímеси do existujúcich materiálov mierne vylepšujúce životnosť a prúdovú zaťažiteľnosť, bez veľkých zmien energetickej hustoty. Lítiové akumulátory bezpochyby predstavujú perspektívny zdroj energie pre najrôznejšie aplikácie, kde nemožno použiť napájanie zo siete. Ich energetická hustota je veľmi vysoká a v súčasnej dobe klesá ich cena. Orientácia na trhu je pre spotrebiteľov mnohokrát zložitá a nezostáva tak ako dohľadávať skúsenosti s jednotlivými výrobcami a typy článkov. Nevýhodou u väčších batérií môže byť nutnosť balančných obvodov pre jednotlivé články a horšie požiarne vlastnosti.

Názov lítium-iónových batérií je odvodený od prenosu lítiových iónov medzi elektródami, a to pri vstrekaní energie na účely uskladnenia aj pri jej extrakcii. Namiesto kovového lítia používajú lítium-iónové batérie ako katódu lítiové oxidy kovov (záporne nabitá elektróda, ktorou elektróny vstupujú do zariadenia), a uhlík zvyčajne slúži ako anóda (kladne nabitá elektróda, ktorou elektróny opúšťajú zariadenie). Na rozdiel od iných batérií s elektródami, ktoré sa menia nabíjaním a vybíjaním, ponúkajú lítium-iónové batérie lepšiu účinnosť, pretože pohyby iónov nechávajú

elektrodové štruktúry nedotknuté. Pre doby skladovania 30 minút až tri hodiny sú lítiové batérie v súčasnosti najhospodárnejším riešením a majú najlepšiu hustotu energie v porovnaní s alternatívami. Pre dlhšie trvanie môže alebo nemusí byť lítium najefektívnejšou voľbou v závislosti od aplikácie, najmä pri zohľadnení životných nákladov [28]

Lítiové batérie sú tiež vysoko konfigurovateľné do rôznych veľkostí strún a stojanov na batérie, aby vytvorili širokú škálu napätí, menovitého výkonu alebo energetických prírastkov. To umožňuje návrhy špecifické pre danú aplikáciu, ktoré sa môžu pohybovať od niekoľkých kilowattov s niekoľkominútovým skladovaním až po riešenia s riešeniami s výkonom niekoľko megawattov s hodinami skladovania, ktoré sa dajú použiť na rozvodni alebo veternej farme.

Celková účinnosť systému uchovávanie energie (ESS) používajúceho lítiové batérie bude zvyčajne vyššia ako pri použití prietokových alebo zinkovo-hybridných batérií. Rýchlosť vybíjania, podnebie a pracovný cyklus zohrávajú veľkú úlohu v efektívnosti. Pracovný cyklus je pracovný cyklus stroja alebo zariadenia, ktoré namiesto prerušovanej práce vyrába prerušovanú prácu. Podobne ako lítiové batérie existuje aj niekoľko typov prietokových batérií s rôznymi chemickými postupmi. Väčšina komerčných snáh o mriežkové riešenia využíva niektorú formu roztoku vanádu, železa, brómu alebo sodíka. RFB sú v porovnaní s tradičnými batériami jedinečné, pretože výkon (kW) systému je založený na zvolenej veľkosti zásobníka a kapacita (kWh) sa volí nezávisle na základe veľkosti zásobnej nádrže a objemu elektrolytov v nádržiach[28].

V praxi sa však infraštruktúra potrebná na čerpanie a správu nádrží stáva ekonomicky životaschopná pre systémy so štvorhodinovou energiou alebo viac, v porovnaní s menovitým výkonom energetických komínov. Mnoho prietokových batérií sa vyznačuje extrémne dlhou životnosťou - desiatkami tisíc cyklov alebo (teoreticky) neobmedzenou životnosťou. Napríklad nedochádza k inherentnej degradácii roztokov vanádu, pretože sa medzi nádržami vymieňajú ióny, a predpokladá sa zvyšková hodnota roztoku vanádu na konci životnosti systému. Aj keď majú zvyčajne vyššie počiatočné náklady v porovnaní s inými batériami, môžu byť náklady na životnosť prietokových batérií nižšie, najmä v aplikáciách s veľkým cyklom [28]

Skladovanie energie je jedným z prvkov energetického systému, ktorého použitie je spojené so zvýšením nezávislosti prevádzky siete, ale vyžaduje si aj ďalšie investičné náklady. Tieto náklady na vysoko špecializované systémy môžu byť v určitých špecifických prípadoch ekonomicky nerentabilné, aj keď môžu umožniť zachovanie stability systému v prípade narušenia. Preto je možné odhadnúť a určiť optimálnu hodnotu kapacity akumulácie energie s cieľom minimalizovať náklady [29].

Skladovanie pozostávajúce z paketov lítium-iónových článkov môže dosiahnuť kapacitu niekoľkých megawattov, čo im umožňuje používať na riadenie činnosti systému zloženého z obnoviteľných zdrojov a umožňuje parametre (napätie, frekvencia, činný výkon a jalový výkon) tohto systému byť kontrolovaný. Rovnako ako u iných typov ukladania energie, aj tieto systémy by mali byť optimálne dimenzované z hľadiska výkonu a energetickej kapacity pomocou vstupných charakteristík a krivky zvyškového zaťaženia, t. J. S prihliadnutím na energetickú náročnosť aj na výrobu z „nevyhnutných“ konvenčných jednotiek.

Komponenty ESS sú zoskupené podľa funkcií do komponentov batérie, komponentov potrebných pre spoľahlivú prevádzku systému a komponentov sieťového pripojenia.

- Systém batérií pozostáva z bloku batérií, ktorý spája viac článkov s príslušným napätím a kapacitou; systém správy batérií (BMS); a systém riadenia teploty batérie (B-TMS). Systém BMS chráni články pred škodlivou prevádzkou, pokiaľ ide o napätie, teplotu a prúd, aby sa dosiahla spoľahlivá a bezpečná prevádzka, a vyvažuje rôzny stav nabitia článku (SOC) v rámci sériového pripojenia. B-TMS riadi teplotu článkov podľa ich špecifikácií, pokiaľ ide o absolútne hodnoty a teplotné gradienty v balení.
- Komponenty potrebné na spoľahlivú prevádzku celého systému sú riadenie a monitorovanie systému, systém energetického manažmentu (EMS) a tepelné riadenie systému. Riadením a monitorovaním systému je všeobecné (IT) monitorovanie, ktoré je čiastočne kombinované do celkového systému kontroly a zberu údajov (SCADA), ale môže zahŕňať aj ochranné alebo výstražné jednotky. EMS je zodpovedný za riadenie, riadenie a distribúciu toku energie v systéme. Systémový tepelný manažment riadi všetky funkcie spojené s vykurovaním, vetraním a klimatizáciou bezpečnostného systému.
- Výkonovú elektroniku je možné zoskupiť do konverznej jednotky, ktorá prevádza tok energie medzi sieťou a batériou, a požadovaných riadiacich a monitorovacích komponentov - jednotky snímajúce napätie a tepelnú správu komponentov výkonovej elektroniky (chladenie ventilátora) [29].

2.3.1 Chemické a fyzické batérie

V súlade s metódami skladovania a uvoľňovania energie, ktoré možno rozdeliť na fyzické batérie a chemické batérie. Chemické batérie obsahujú chemické látky prechádzajúce cez materiál opakovanej reakcie, ktoré sa pri reaktívnych účinných látkach premieňajú z chemickej energie na

elektrinu a na základe nabíjania a vybíjania sa môžu recyklovať na primárnu batériu a sekundárnu batériu. Primárna batéria sa môže vybiť iba raz a až doposiaľ nebude poháňať elektrickú záťaž. Na konci času v režime vybíjania, keď batéria nemá všetky chemické látky, má chemický účinok, už nemôže byť schopná zabezpečiť elektrinu a nemôže byť zabezpečená externým zdrojom napájania, až potom po úplnom vybití bude táto batéria zbytočná. Je to preto, lebo je to elektrochemická reakcia je ireverzibilná z dôvodu, že elektrolyt sa nedá obnoviť pomocou kroku dobíjania. Sekundárna batéria sa chemicky premieňa na elektrickú energiu a môže sa nabíjať do batérie nabíjaním batérie, pri ktorej dôjde k premene na chemickú energiu a ktorú je možné znova použiť [30].

Rôzne batérie chemického typu sa spoliehajú na svoje pracovné napätie, kapacitu a bezpečnosť vo vzťahu, ktorý umožňoval rôzne aplikácie. Lítiová batéria sa týka hlavne lítium-iónových batérií. V súčasnej dobe na trhu možno nájsť pre lítium kobaltový materiál, lítium mangán materiálu, ale obaja pri použití zabezpečenia na pochybách, že bude príčina vysokej teploty, ktorá bude mať za následok výbuch alebo pokles kapacity problému. Zlepšenie problémov s bezpečnosťou používateľa pri vylepšovaní lítiových batérií na lítium-fosfátové železo (LiFePO_4) [30].

V súčasnosti na trhu, ktoré využívajú najrozsiahlejšiu sekundárnu batériu, sú v súčasnosti olovené batérie a lítiové batérie, ako sú lítium-kadmiové batérie, nikel-metal hydridové batérie, lítium-kobaltové batérie a batérie LiFePO_4 . Olovená batéria vďaka širokej prevádzkovej teplote, jednoduchšej štruktúre, vyspelým technológiám a nízkym cenovým charakteristikám, ktoré umožňujú vyššiu mieru používania, ale nižšiu životnosť a koeficient vybíjania (alebo nazývaný prepravka), vyšší vnútorný odpor a vysoká toxicita spôsobená vysokou spotrebou. znečistenia, aby sa nahradil iným chemickým akumulátorom. v tomto príspevku sa zaoberáme akumulátorovými batériami LiFePO_4 , ktoré majú výhody vysokej kapacity, nízkej toxicity a žiadneho znečistenia, prostredia s vysokou teplotou a dobrého obehového výkonu pri vysokovýkonnom nabíjaní a vybíjaní a veľkých zdrojov surovín [31]

V porovnaní s inými skupinami lítiových batérií majú batérie LiFePO_4 vysokú účinnosť premeny energie až na 95% a majú až 2 000-krát dlhší životný cyklus ako 400 až 500-krát životnosť ostatných lítiových batérií. Batérie LiFePO_4 sú tiež veľmi vhodné na napájanie elektrických motorov a na správu napájania, ako sú elektrické skútre, čisté elektrické skútre a hybridné automobily atď., a v budúcnosti sa stanú hlavným prúdom elektrických vozidiel [30]:

Výhody:

- nízka výrobná cena (dostupnosť železa)

- netoxické a šetrné k životnému prostrediu [32]
- neobsahujú kovy vzácnych zemín [33]
- lepšia tepelná a chemická stabilita ako ostatné Li-ion batéria [33]
- bezpečné - odolné proti tepelným únikom [34]
- schopnosť dodávať takmer konštantné napätie 3,2 V po celú dobu vybíjania [33]
- schopnosť dodávať vysoký prúd pri špičkových odberoch [34]
- vysoká špecifická kapacita $170 \text{ Ah} \cdot \text{kg}^{-1}$ [32]
- schopnosť rýchleho nabíjania [35]
- nízka údržba [33]
- možnosť využiť 100% kapacity batérie (100% DOD = hĺbka vybitia z anglického "Depth of Discharge") bez dlhodobých následkov [36]
- nemajú pamäťový efekt (je možné nabíjať za každého stavu vybitia batérie) [37]
- prakticky nemajú samovybíjací efekt [37]

Nevýhody:

- nízky výkon pri nízkych teplotách (rádovo -40°C do -20°C) [38]
- nemožno použiť pre malé prenosné zariadenia [34]
- nižšia energetická kapacita ako ostatné Li-ion (napr. LiCoO_2) batérie [35]
- trpí efektom starnutia (cykly nabitia / vybití spôsobujú zníženie kapacity batérie) [39]
- rezervy lítia sa odhadujú cca na 15115000 t v roku 2019 [40].

Zdroj [36] uvádza, že sú ponúkané LiFePO_4 batérie v niekoľkých rôznych prevedeniach pre rôzne hodnoty kapacity v Ah. Bol vybraný jeden konkrétny typ - Winston článok Lithium Yttrium - LiFePO_4 / LiFeYPO_4 akumulátor 3,2 V, 700 Ah. [41].

3 LÍTIOVÉ AKUMULAČNÉ SYSTÉMY

3.1 Battery management system

Pre svoju vysokú účinnosť a vysokú hustotu energie boli lítium-iónové batérie prijaté pre mobilné elektronické zariadenia a elektrické vozidlá. Stále viac sa používajú na rôzne aplikácie, ako sú vozidlá s malou mobilitou (elektrické motocykle, golfové vozíky atď.), stacionárne batérie pre HEMS (domáci systém riadenia energie), nákladné vozidlá / autobusy a priemyselné stroje. Pri nesprávnom použití však riskujú ďalšie riziko a zásah elektrickým prúdom. Aby bolo možné bezpečne a efektívne používať vysoko účinné lítium-iónové batérie, je potrebný systém správy batérií (BMS). Z BMS sú dôležité technológie odhadu kapacity batérie a detekcie poruchy [42].

Systém správy batérií musí:

- rozlišovať medzi limitmi nabíjacieho a vybíjacieho prúdu,
- dynamicky riadiť napätie a teplotu jedného článku počas nabíjania a vybíjania a včasne varovať pred odpojením akumulátora,
- umožniť vzájomnú závislosť alebo časovú závislosť závislé medzné úrovne a
- umožniť vyrovnanie (vyváženie) buniek [43].

Systémy správy batérií (BMS) predstavujú systémy v reálnom čase riadiace mnoho funkcií nevyhnutných pre správnu a bezpečnú prevádzku systému akumulácie elektrickej energie v EV a PHEV. Zahŕňa to monitorovanie teplôt, napätí a prúdov, plánovanie údržby, optimalizáciu výkonu batérie, predpovedanie porúch a / alebo prevenciu, ako aj zber / analýzu údajov o batérii. Systémy správy batérií sa tiež bežne používajú v iných batériových aplikáciách, ako je manipulácia s materiálom, zdroje neprerušiteľného napájania, napájacie systémy mimo sietí, námorné a batériové banky pre alternatívne zdroje energie. Požiadavky na BMS pre tieto aplikácie sú často veľmi podobné požiadavkám na automobilovom trhu, to znamená, že je vždy dôležité riadiť články a batérie robustným, spoľahlivým a optimálnym spôsobom. Všetky lítium-iónové (Li-ion) batérie vyžadujú BMS [44].

Je to tak kvôli skutočnosti, že všetky lítium-iónové batérie zlyhajú, ak sú prebíjané, úplne vybité alebo ak sú prevádzkované mimo teplotného limitu. Každý typ lítium-iónových článkov má vlastnú bezpečnú pracovnú oblasť, čo si vyžaduje zodpovedajúce programovanie BMS.

V nízkonákladových systémoch sa môžu vyskytnúť určité rozdiely v požiadavkách alebo funkciách pre BMS. Najmä pre nízky počet článkov v sérii (napr. Systémy s napätím 12 V so štyrmi článkami v sérii) navrhujú niektorí výrobcovia batériových systémov jednoduchý externý podpäťový vypínací obvod a nabíjačku s riadeným napätím na konci nabíjania. Pre väčšie a zložitejšie systémy BMS zaručuje ochranu vysoko drahých komponentov a zvyšuje funkčnosť systému. Na úvod je dôležité pochopiť rozdiel medzi pojmi „batéria“, „modul“ a „článok“. Batéria je v podstate kompletne zostavený balíček s elektrickými, mechanickými a komunikačnými signálnymi rozhraniami. Sada sa môže skladať z niekoľkých modulov, ktoré sú zapojené do série a / alebo (menej často) paralelne. Modul možno opísať ako súčasť batérie a je obvykle obsiahnutý v kryte batérie, aj keď s veľmi veľkými batériami je možné moduly pripojiť aj samostatne pomocou káblov. V každom module sú jednotlivé bunky zapojené do série alebo paralelne [44].

Ak sú moduly zapojené paralelne, je možné získať vyššie prúdy a sériové pripojenie vedie k vyššiemu napätiu. V module musí byť monitorovaný každý článok, aby bola zaručená správna funkcia v požadovanom prevádzkovom rozsahu (napätie, prúd a teplota). Ovládanie týchto modulov sa realizuje pomocou modulovej riadiacej jednotky (MCU). V batérii je niekoľko z týchto MCU pripojených priamo alebo cez komunikačnú zbernicu s kontrolným obvodom alebo riadiacou jednotkou batérie (BCU), ktorá na základe vstupu MCU počíta historické hodnoty a obsahuje všetky opatrenia potrebné na ochranu batérie. a udržiavať výkonnosť balíka.

Všeobecne možno MCU a BCU konfigurovať rôznymi spôsobmi, v závislosti od zložitosti a funkčnosti systému. Líšia sa jednoduchosťou a cenou.

Rôzne konfigurácie sú popísané nasledovne:

- Konfigurácia jednej dosky: Toto je nízkonákladová možnosť pre malý počet buniek, ktoré znamená, že BMS je zostavený na jednej jedinej doske s plošnými spojmi. Batériové moduly nepotrebujú prispôbenie systému okrem zariadení na snímanie napätia, prúdu a teploty. Doska BMS sa skladá z niekoľkých aplikačne špecifických integrovaných obvodov (ASIC), ktoré riadia batériové moduly. Na riadenie najvyššej úrovne dohliada BCU [45].

Táto jednotka okamžite odpojí batériu od aplikácie, ak čo i len jeden parameter batérie prekročí stanovený rozsah.

- Výhoda: Nízkonákladové BMS.
- Nevýhoda: Každý merací signál musí byť pripojený individuálne k doske BMS.

Konfigurácia inteligentných modulov

V tejto štruktúre obsahuje každý batériový modul ASIC, ktorý modul priamo chráni. ASIC sú schopné komunikovať s BCU cez sériové periférne rozhranie (SPI), takže všetky spojenia z jednej dosky môžu byť redukované na jednu SPI Bus, spoločnú pre všetky moduly.

Výhoda: Menej káblového pripojenia s každým batériovým modulom ako v štruktúre jednej dosky.

Nevýhoda: MCU môže odosielať informácie iba vtedy, ak to vyžaduje BCU (Master). Je teda možné, že sa údaje stratia [42]. V tejto konštitúcii sa zlepšila komunikačná nevýhoda inteligentných modulov. Teraz MCU komunikuje cez súkromné CAN rozhranie s BCU, kde je možné zabrániť chybám. Na inicializáciu tohto spôsobu komunikácie je potrebný mikrokontrolér MCU má stále tieto úlohy: merať a dohliadať na napätie, merať teplotu a vyvážiť články [44].

Zvyšok kontroly je súčasťou BCU. Zahŕňa to detekciu stavu nabitia (SoC) a zdravotného stavu (SoH), správu tepla a kontrolu relé prepínania. Ďalej musí prepojiť BMS so zvyškom vozidla cez CAN. Konfigurácia plne inteligentných modulov [44].

V porovnaní s inteligentným modulom svetla je jedinou odlišnosťou tejto štruktúry to, že niektoré funkcie BCU prevezme MCU. Patrí sem napríklad stanovenie SoC a SoH. Toto je preferované riešenie pre veľmi veľké batériové systémy, ako sú systémy na skladovanie energie pre pripojenie k sieti. Konečná konfigurácia závisí vo veľkej miere od aplikácie, ako aj od požadovaného stupňa bezpečnosti a redundancie. Čím je batéria väčšia, tým je konfigurácia zložitejšia.

Funkcie správy batérie MCU

Vo všeobecnosti obsahuje minimálne merania napätia, teploty a prúdu. Tieto hodnoty sa potom spracujú pomocou ASIC alebo malého analógového obvodu a sú potrebné na ochranu jednotlivých článkov pred poruchami. BCU berie dáta z MCU a realizuje funkcie na vyššej úrovni. Funkcie je možné rozdeliť do skupín podľa obrázka 15.3. Zatiaľ čo niektoré z funkcií, napr. ochrana a riadenie výkonu, sú povinné pre všetky BMS, niektoré závisia od architektúry systému a stupňa sofistikovanosti batérie [45].

Tri hlavné hodnoty, ktoré je možné merať priamo, sú: napätie, prúd a teplota. Teplotu je však možné určiť iba nepriamo, je nemožné ju zmerať vo vnútri bunky. Najčastejšie sa merania uskutočňujú na vrchu anódového kolektora alebo v strede puzdra bunky.

Vo viacčlánkovej batérii (sériové pripojenie) sa objavujú malé rozdiely v kapacite článkov z dôvodu výrobných tolerancií alebo odlišných prevádzkových podmienok a majú tendenciu sa zväčšovať s každým nabíjajúcim cyklom. Navyše sa časom kapacita niektorých článkov stráca

pomocou samovybíjajúcich procesov (zvyčajne 2–10% v závislosti od teploty a SoC). Ak rozloženie teploty v balení nie je rovnaké, majú horúce články tendenciu k vyšším stratám kapacity, čo nakoniec vedie k nerovnováhe. Takéto slabšie články sú tiež počas nabíjania nadmerne namáhané. Táto pretrvávajúca nerovnováha spôsobuje posun kapacity, až kým nakoniec slabšia bunka nevyjde. Vyváženie buniek je spôsob vyrovnania náboja všetkých článkov v reťazci [46].

Existuje veľa rôznych metód vyvažovania. Základné rozdelenie sa robí delením vyvažovacej metódy na aktívne a pasívne. V prípade aktívneho vyváženia sa energia prenáša medzi susednými bunkami. Metódy pasívneho vyvažovania zvyčajne používajú spínací rezistor, ktorý je zapnutý pre najviac nabitý článok v reťazci batérie. Bunka sa vybije a energia sa rozptýli ako teplo [47]. Ovládanie nabíjania obmedzuje rýchlosť dodávania elektrického prúdu do každého článku, aby sa batéria udržala v bezpečnej prevádzkovej oblasti. Medzi ďalšie funkcie môže patriť komunikácia s externou inteligentnou nabíjačkou a hlásenie požadovaných parametrov nabíjania, ako aj stavu batérie.

Lítium-iónové batérie nemožno vybiť pod stanovený limit. Ak batéria zostáva dlho úplne nabitá, mala by BMS túto situáciu zistiť a prepnúť do prevádzkového režimu s úsporou energie. V režime úspory energie vykonáva BMS iba základné funkcie, aby znížila spotrebu energie na minimum a zabránila vybitiu batérie [48].

Ak jeden parameter článku (napätie, prúd, teplota) prekročí prípustný rozsah, jednotka buď okamžite otvorí hlavný vypínač, alebo vydá varovný príkaz a umožní úplné krátkodobé preťaženie pred úplným odpojením. Hlavné výkonové stykače musia byť dimenzované na mierne vyššie prúdy ako menovité zaťaženie a mali by byť schopné prerušiť niekoľkonásobok skratového prúdu. V opačnom prípade by mala byť batéria chránená poistkou. V niektorých aplikáciách kritických z hľadiska bezpečnosti bude ponechané na užívateľovi, či chce odpojiť batériu v prípade nadprúdu, hlbokého vybitia alebo prehriatia. Napríklad pilot v elektrickom klzaku bude mať pri štarte radšej poškodenie batérie než uvoľnenie ťahu [49].

Pomocou tejto funkcie získa batéria inteligentný systém riadenia energie, ktorý zabráni nadmernému vybíjaniu prúdu alebo rekuperačným brzdným prúdom, keď je SoC už príliš vysoký. Udržiavanie SoC v určitom rozmedzí (napr. 30–80%) by mohlo zvýšiť kapacitu napájania a / alebo predĺžiť životnosť. Systém riadenia energie sa musí individuálne prispôbiť aplikáciám, kde sa používa BMS [49].

Funkcia prebíjania je potrebná, ak je batéria pripojená k systému s vysokou vstupnou kapacitou. V dôsledku toho môže do záťaže prúdiť vysoký zapínací prúd a poškodiť vstupné kondenzátory alebo dokonca vysoko výkonné relé. Na zníženie týchto prúdových špičiek sú paralelne umiestnené

dve relé. Jedno z nich, relé na prebíjanie, obsahuje sériový rezistor, ktorý tlmí aktuálny vrchol. Po chvíli je vstupný kondenzátor nabitý a hlavný vypínač je možné uzavrieť bez toho, aby sa vynútili vysoké prúdy [49].

Batéria používaná vo vysoko výkonných aplikáciách môže byť často vystavená značnému množstvu tepla rozptýleného vo vnútri článkov. Na zaistenie bezpečných teplôt článkov a vysokého výkonu môže byť batéria vybavená aktívnym chladiacim systémom, ktorý môže byť pod kontrolou BMS. Jednou z najdôležitejších úloh všetkých BMS je stanovenie SoC. Definuje sa ako množstvo elektrického náboja, ktoré je v batérii a môže sa vybiť. Spravidla sa vyjadruje ako percento maximálneho obsahu nabitia batérie. Bohužiaľ neexistuje žiadny priamy spôsob merania SoC a nepriame spôsoby trpia obmedzeniami [49].

3.2 Návrh BMS pre konkrétnu aplikáciu

Pre návrh BMS je potrebné dopredu poznať pomery na zariadenie pre ktorých je tento návrh realizovaný. Či sa jedná o samostatnú jednotku, alebo bude systém riadenia batérie podsystémom riadiacej jednotky pohonu. Predpokladanú znalosť zariadení obsluhou a stavy v ktorých bude zariadenie prevádzkované. Toto udáva prvotnú predstavu o zložitosti a rozsiahlosti BMS, prípadne jeho podsystémov.

4 ZÁVER

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] P. 2. HRZINA, Jak efektivně eliminovat rizika při provozu Li-Ion bateriových systémů.
- [2] SCHLESINGER, The Battery: How Portable Power Sparked a Technological Revolution. J.
- [3] CHOWDHURTY, Techno-environmental analysis of battery storage for grid level energy services. P. e. a. 2.
- [4] HALL, Energy-storage technologies and electricity generation. B. 2. SCROSATI, Lithium-ion batteries. A look into the future.
- [5] REDDY, Brief History of Early Lithium-Battery Development. J. e. a. 2.
- [6] DING, Smart Multifunctional Fluids for Lithium Ion Batteries: Enhanced Rate Performance and Intrinsic Mechanical Protection. E. e. a. 2
- [7] MOSALI, Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. N. 2.
- [8] NITTA, Li-ion battery materials: present and future. A. 2.
- [9] AZZIZ, Lithium Batteries: Computational Design and Preparation of Cation-Disordered Oxides for High-Energy-Density Li-Ion Batteries (Adv. Energy Mater. 15/2016). A. e. a. 2.
- [10] KUMAR, Methods of synthesis and performance improvement of lithium iron phosphate for high rate Li-ion batteries: A review. B. U. 2020., https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. D. e. a. 2.
- [11] ZHAND, Study on the Characteristics of a High Capacity Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion Battery—An Experimental Investigation. E. 2.
- [12] VINODKUMAR, Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review. E. e. a. 2. ZHANG,). Enhancing the high-rate performance of LiFePO₄ battery with carbonized-filter paper as an interlayer. S.
- [13] TELEKE, Subhashish Bhattacharya and Loren Anderson, IEEE Transactions on Energy Conversion.
- [14] Lithium Shortage Expected Due to Lack of Mines [online]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/17068/LithiumShortage-Expected-Due-to-Lack-of-Mines.aspx>

- [15] 5 minutes with... Kunal Phalpher, chief commercial officer, Li-Cycle, Canada. E-Waste World Conference & Expo [online]. 8. říjen 2019 Dostupné z: <https://www.ewaste-expo.com/5-minutes-with-kunal-phalpher-chief-commercial-officerli-cycle-canada/> [
- [16]. LITHIOVE
- [17]. LITHOVE
- [18] Yourey, W. Theoretical Impact of Manufacturing Tolerance on Lithium-Ion Electrode and Cell Physical Properties. *Batteries* 2020, 6, 23.
- [19] K. Wu, J. Yang, Y. Zhang, Ch. Wang, D. Wang, Investigation on Li₄Ti₅O₁₂ batteries developed for hybrid electric vehicle, *J Appl Electrochem* (2012)
- [20] Yoshino, A. (2012), The Birth of the Lithium-Ion Battery. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51: 5798–5800. doi:10.1002/anie.201105006
- [21] PETR, J. Nové materiály pro Li-iontové baterie pracující na principu konverze. Brno, 013.
- [22] Internetový zdroj, 3M Battery Materials for Automotive Applications: <http://mobi.vub.ac.be/wp-content/uploads/downloads/2014/12/3M.pdf> ,
- [23] Internetový zdroj, 3M Battery Materials: <http://multimedia.3m.com/mws/media/773457O/3mtm-battery-cathode-presentation.pdf> ,
- [24] Joshua Harris, University of Massachusets, internetový zdroj: <http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch471/documents/Lithium%20Air%20Presentation%20josh.pdf> ,
- [25] FEDORKOVÁ, A.: Analytical characterization of polypyrrole-LiFePO₄ powder as positive electrode material for lithium-ion batteries. Bratislava, 2010. Dizertační práce. Univerzita Komenského v Bratislavě
- [26] WINDPOWER ENGINEERING. 2021. <https://www.windpowerengineering.com/how-three-battery-types-work-in-grid-scale-energy-storage-systems/>
- [27] WENGE, CH. et al. 2020. Multi Usage Applications of Li-Ion Battery Storage in a Large Photovoltaic Plant: A Practical Experience
- [28] Typical Applications for LiFePO₄ Batteries. Bioenno Power [online]. [vid. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.bioennopower.com/pages/typical-applications-for-lifepo4-batteries>
- [29] BATTERY UNIVERSITY. 2020. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.

- [30] ZHANG, D. et al. 2018. Study on the Characteristics of a High Capacity Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion Battery—An Experimental Investigation
- [31] VINODKUMAR, E. 2018. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review
- [32] Zhang, Zhian & Zhang, Zhiyong & Chen, Wei & Wang, Guanchao & L, Jie & Lai, Yanqing. (2015). Enhancing the high-rate performance of LiFePO₄ battery with carbonized-filter paper as an interlayer. New J. Chem.. 39. 10.1039/C4NJ02388A.
- [33]. Sercan Teleke,, Mesut E. Baran, Alex Q. Huang, Subhashish Bhattacharya and Loren Anderson, IEEE Transactions on Energy Conversion, 24(3), (2009)
- [34] Lithium iron phosphate battery [online]. 2019 [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium_iron_phosphate_battery&oldid=921939971
- [35] B. WU, Yonghuan REN a Ning LI. LiFePO₄ Cathode Material. Electric Vehicles - The Benefits and Barriers [online]. 2011 [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/lifepo4-cathode-material>
- [36] State of charge [online]. 2019 [vid. 2019-10-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=State_of_charge&oldid=907987231 Energetický ústav FSI VUT v Brně Bc. Jan Petrenec Akumulace elektrické energie pro zdroj s nestabilní produkcí 80
- [37] How to charge Lithium Iron Phosphate lithium ion battery packs including packs with high current and High Capacity. [online]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/LLLF.htm>
- [38] Kinstar batteries: Lithium-ion, Lithium-ion Polymer and LiFePO₄ batteries for various applications. Kinstar [online]. Dostupné z: <http://www.kinstarbattery.com/Service/faq/18>
- [39] Lithium-železo-fosfátový akumulátor [online].. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium-%C5%BEElezofosf%C3%A1tov%C3%BD_akumul%C3%A1tor&oldid=17419840
- [40] LiFePO₄ battery|LiFePO₄ battery pack | Hot battery introductions. Dostupné z: <https://www.pdbattery.com/lifepo4-battery.html>
- [41] Official Depth Of Discharge Recommendations For LiFePO₄ - Victron Energy [online]. [vid. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://community.victronenergy.com/questions/10779/official-depth-of-dischargerecommendations-for-li.html>

- [42] What is Depth of Discharge (DOD) and how does it affect a battery? Battle Born Batteries [online]. Dostupné z: <https://battlebornbatteries.com/depth-ofdischarge-li-ion-deep-cycle-batteries/>
- [42] Winston článek Lithium Yttrium - LiFePO₄/LiFeYPO₄ akumulátor 3.2V, 700Ah | battery.cz
- [Bergveld, 2001] Bergveld, H. J. (2001). Battery Management Systems Design by Modelling.
- [43] Jiang, J.; Zhang, C. Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles; Wiley Online Library: Hoboken, NJ, USA, 2015
- [44] Pop, V. (Ed.) Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery Powered Applications; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2008.
- [45] Xing, Y.; Ma, E.W.M.; Tsui, K.L.; Pecht, M. Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. *Energies* 2011, 4, 1840–1857
- [46] Xiong, R.; Ma, S.; Li, H.; Sun, F.; Li, J. Toward a Safer Battery Management System: A Critical Review on Diagnosis and Prognosis of Battery Short Circuit. *iScience* 2020, 23, 10 1010.
- [47] Lu, L.; Han, X.; Li, J.; Hua, J.; Ouyang, M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *J. Power Sources* 2013, 226, 272–288.
- [48] Sun, S.; Liang, B.; Dong, M.; Taylor, J.A. Phase Balancing Using Energy Storage in Power Grids under Uncertainty. *IEEE Trans. Power Syst.* 2015, 31, 3891–3903.
- [49] Wenger, M.; Waller, R.; Lorentz, V.R.H.; Marz, M.; Herold, M. Investigation of gas sensing in large lithium-ion battery systems for early fault detection and safety improvement. In *Proceedings of the IECON 2014—40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, USA, 29 October–1 November 2014; pp. 5654–5659